

<https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-09>

Гуриненко Наталья Сергеевна, магистр техн. наук, старший преподаватель, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

ТЕХНОЛОГИЯ, КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ, ПРОЧНОСТЬ И СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ

© РУП «Институт БелНИИС», 2019
Institute BelNIIS RUE, 2019

АННОТАЦИЯ

В материале статьи приведены результаты исследований влияния на кинетику твердения и свойства тяжелого бетона разрабатываемой полифункциональной комплексной добавки, содержащей пластификатор, ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) и ускоряюще-уплотняющий компонент, с целью повышения темпа роста и уровня прочности бетона на основе формирования более плотной структуры цементного камня и зон его контакта с поверхностью зерен заполнителя.

Экспериментально подтверждена эффективность предлагаемой добавки при ее применении как в высокопрочном, так и в «рядовом» по прочности бетоне с целью повышения темпа и уровня роста прочности, снижения энергетических затрат в технологии производства бетонных и железобетонных изделий и монолитном строительстве, повышения плотности и непроницаемости, а на этой основе качественных характеристик бетона – водонепроницаемости, морозостойкости и защитной способности по отношению к стальной арматуре.

Показана возможность значительного снижения энергетических затрат на прогрев бетона с полифункциональной комплексной добавкой за счет использования «термосного» режима его твердения с начальным разогревом до 30...35 °С и последующей выдержки в тепловом устройстве без подвода тепла. В этих

условиях бетон с полифункциональной комплексной добавкой при прогреве по режиму «2 ч. предварительной выдержки, 2 ч. подъема температуры и 12 ч. выдержки в тепловом устройстве» набирает прочность на уровне 80...90 % от проектной (28 суточной), что достаточно не только для передачи преднапряжения арматуры на бетон, но и для отпуска изделий потребителю.

В исследованиях использовали стандартизованные методики оценки прочности и эксплуатационных свойств бетона.

Ключевые слова: цемент, бетон, ультрадисперсный микрокремнезем, микрокремнезем, твердение, цементный камень, структура, прочность, свойства.

Для цитирования: Гуриненко, Н. С. Технология, кинетика твердения, прочность и свойства тяжелого бетона с полифункциональной комплексной добавкой / Н. С. Гуриненко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 125–146. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-09>

Natalia Gurinenko, Master in Engineering Science, Senior Lecturer, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

TECHNOLOGY, KINETICS OF HARDENING, STRENGTH AND PROPERTIES OF HEAVY CONCRETE WITH POLYFUNCTIONAL COMPLEX ADDITIVE

ABSTRACT

The article presents the results of studies on the kinetics of hardening and the properties of heavy concrete being developed by a multifunctional complex additive containing a plasticizer, ultradispersed microsilica (UDMS) and an accelerating compaction component in order to increase the growth rate and level of concrete strength based on the formation of a more dense cement stone structure and zones of its contact with the surface of the aggregate grains.

The effectiveness of the proposed additive was experimentally confirmed in its application both in high-strength and “ordinary” concrete in terms of strength in order to increase the rate and level of strength growth, reduce energy costs in the production technology of concrete and reinforced concrete products and monolithic construction, increase density and impermeability, and on this basis, the quality characteristics of concrete - water resistance, frost resistance and protective ability in relation to steel reinforcement.

The possibility of a significant reduction in energy costs for heating concrete with a multifunctional complex additive is shown, due to the use of the “thermos” mode of its hardening with initial heating to 35 ... 40 ° C and subsequent aging in a thermal device without heat supply. Under these conditions, concrete with a multifunctional complex additive during heating according to the mode: 2 hours of preliminary exposure, 2 hours of temperature rise, and 12 hours of exposure in a thermal device gains strength at 80 ... 90% of the design (28 days), which is not only enough for transferring prestressing of reinforcement to concrete, but also for dispensing products to the consumer.

The studies used standardized methods for assessing the strength and performance properties of concrete.

Keywords: cement, micro silica, micro silica ultra dispersible, hardening, cement stone, structure, strength, properties, concrete.

For citation: Gurinenko N. Technology, kinetics of hardening, strength and properties of heavy concrete with polyfunctional complex additive. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 11. 2019. pp. 125–146. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-09> (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Бетон для сборных изделий и монолитного строительства должен характеризоваться высокой плотностью и прочностью, чтобы обеспечивать надежную эксплуатацию. В современной технологии такой бетон получают, в частности, используя химические и минеральные добавки. При этом предпочтительнее использовать комплексные добавки, в которых сочетаются разные эффекты

воздействия на реагирующую систему «цемент-вода» в цементном бетоне, взаимно дополняющие друг друга. В частности, рационально, чтобы добавка обеспечивала эффект от снижения водосодержания бетона, а наряду с этим инициировала (катализировала) реакции гидратации цемента, ускоряя процесс образования кристаллогидратов его клинкерных минералов. Также рационально присутствие в такой добавке минеральной (тонкодисперсной) подложки, которая бы понижала энергетический порог начала образования кристаллогидратных комплексов в реагирующем цементном тесте и способствовала ускоренному становлению структуры формирующихся новообразований. При этом целесообразно, чтобы минеральная составляющая комплексной полифункциональной добавки могла вступать в водной среде в реакцию с наименее прочными продуктами гидролиза-гидратации цемента (в частности, с образующейся гидроксидом кальция – $\text{Ca}(\text{OH})_2$) с «переводом» ее в более прочные водонерастворимые соединения (особенно в объемах зон контакта между цементным камнем и зёрнами заполнителя в бетоне).

В статье приведены данные по оценке эффективности в бетоне разрабатываемой полифункциональной добавки, отвечающей изложенным условиям и содержащей в своем составе пластификатор, ускоритель твердения, уплотняющий структуру бетона компонент и минеральный компонент в виде ультрадисперсного микрокремнезема (УДМК), вводимого взамен традиционного микрокремнезема. Результаты исследований подтверждена возможность замены 10 %-ой дозировки последнего на 1,0 % УДМК от массы цемента, что существенно упрощает технологию приготовления бетона при использовании данной добавки.

МАТЕРИАЛЫ И КОНЦЕПЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из практики применения в бетоне традиционного микрокремнезема известны приемы введения его на стадии приготовления бетонных смесей следующими вариантами:

а) в составе специального цемента СЕМ II А-Д (портландцемент с микрокремнеземом), в который микрокремнезем введен на стадии помола клинкера в количестве 6...10 % от массы вяжущего, согласно СТБ ЕН 197–1–2015;

б) в сухом порошкообразном виде с дозированием и введением в бетонную смесь по схеме введения цемента, с использованием соответствующих емкостей хранения и расходных бункеров на оба материала, а также с использованием дополнительных весовых дозаторов либо имеющихся дозаторов цемента при последовательном дозировании вяжущего и кремнезема;

в) в виде пульпы (дисперсии), приготавливаемой непосредственно перед введением в бетонную смесь и смешивании с частью (или с полным объемом) воды затворения.

Очевидно, что как введение микрокремнезема, дозируемого в количестве 10 % и более от массы цемента, в сухом порошкообразном состоянии, так и приготовление в виде дисперсии требует дополнительных затрат. При этом в обоих случаях проблема равномерного распределения этого вещества в объеме приготавливаемого бетона не решается гарантированно, а значит, вполне возможно снижение эффективности применения микрокремнезема в бетоне.

Как нами было выявлено [1] экспериментально: водная дисперсия ультрадисперсного микрокремнезема седиментационно устойчива (однородна) в течение ≤ 45 минут, и ее однородность может быть восстановлена без ухудшения свойств (при применении не снижается прочность цементного камня (таблица 1)) после механического перемешивания осевшего УДМК, т. к. он гидрофилен, но не реагирует с водой.

Таблица 1

Прочность цементного камня в зависимости от срока хранения дисперсии

Время хранения дисперсии, сут.	Прочность на сжатие цементного камня (МПа) как среднее значение результатов испытаний шести образцов в возрасте, сут.:			
	1	3	7	28
0 (свежеприготовленная)	43,3	71,8	76,1	103,4
1	43,4	70,5	76,0	103,9
3	42,8	68,6	77,6	104,0
7	43,2	69,9	78,3	105,1

Таким образом, приготовление водной дисперсии УДМК не представляет сложности и может быть осуществлено простейшим механическим смешиванием его вещества с водой.

В случае приготовления полифункциональной комплексной добавки в экспериментах сначала готовили водный раствор ускоряюще-уплотняющего компонента (Na_2SO_4 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), вводя требуемое количество этих веществ в воду, подогретую до $30\ldots 40^\circ\text{C}$, т. к. это оптимальная температура для растворения сульфата натрия [2]. Затем в этот раствор вводили в расчетном количестве пластификатор, для которого указанная температура также является оптимальной. Последним компонентом в подготовленный раствор из трех указанных веществ дозировали требуемое количество ультрадисперсного микрокремнезема. Полученный «раствор-дисперсию» перед применением механически перемешивали, в требуемом количестве смешивали с водой затворения и вводили в бетон (мелкозернистый и с крупным заполнителем), результаты исследований свойств которого приведены в данной статье.

Характеристики материалов. В исследованиях использован портландцемент марки ПЦ 500-Д0 по ГОСТ 10178, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБ ЕН 197-1 ($K_{\text{нт}} = 0,25$, со сроками схватывания: начало – 2 ч. 10 мин., конец – 3 ч. 50 мин.); щебень гранитный (Микашевичи) фракции 5...20 мм, соответствующий требованиям ГОСТ 8267–93; щебень гранитный (Микашевичи) кубовидный фракций 2...4, 4...6 мм, соответствующий требованиям СТБ 1311–2002; природный (мытый) песок с модулем крупности $M_k \sim 2,6\ldots 2,8$ доли ед., соответствующий требованиям ГОСТ 8736–93.

Вода для затворения и последующего твердения бетона, соответствующая требованиям СТБ 1114–98 и ГОСТ 23732–2011; сульфат натрия (Na_2SO_4 ; СН) кристаллизационный по ГОСТ 21458-75; сульфат алюминия (СА; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) по ГОСТ 12966-85.

В качестве активного минерального компонента добавки использовали традиционный микрокремнезем МК-85 (МК), соответствующий требованиями СТБ ЕН 197–1–2015, и ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК), соответствующий ТУ 2168–002–14344269–09; в качестве пластификаторов использовали «Стахемент 2000-МЖ 30», выпускаемый по ТУ ВУ 800013176.004-2011, «Sika ViscoCrete» (ТУ 2493-009-13613997-2011) и «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 190679156.002-2013), которые согласно СТБ 1112-98 относятся к пластифицирующим добавкам I группы.

ПРОЧНОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА С ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ

Одной из задач, которая была решена в экспериментальных исследованиях с высокопрочным бетоном, являлась оценка возможности замены микрокремнезема (МК) в его составе на ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) при дозировке последнего в 10 раз меньше, но без снижения прочности бетона.

На данном этапе оценили изменения в кинетике роста прочности (на сжатие) бетона, содержащего 10 % от МЦ микрокремнезема либо 1,0 % от МЦ ультрадисперсного микрокремнезема при твердении образцов в нормально-влажностных условиях (постоянно или после 1 суток твердения при кратковременном (за 2...2,5 часа) нагреве до $t \sim 30...35^\circ\text{C}$) до момента испытаний через 1; 3; 7; 28 и 90 суток.

Для исследований использовали номинальный состав, приведенный в таблице 2 и обоснованный в источнике [3] как обеспечивающий прочность бетона на сжатие в проектном возрасте $f_{cm,28} \sim 100...110$ МПа при использовании «традиционного» микрокремнезема в дозировке 10 % от МЦ и пластификатора I-ой группы – «гиперпластификатора» Ст2000 в виде раствора 35 % концентрации в дозировке 1...2 % от массы цемента.

Коэффициент вариации прочности бетона, определенный по всей серии образцов (более 30 шт.) в проектном возрасте (28 сут.), составил $< 5\%$, что свидетельствует о достаточно высокой степени однородности бетона и достоверности полученных данных.

Таблица 2

Составы бетона для оценки кинетики твердения и уровня его прочности в проектном возрасте

№ состава	Расход компонентов, кг:							Хим. добав- ка, Ст 2000, % от МЦ*
	Цемент	Песок	Кубовидный щебень крупностью мм		МК	УДМК	Вода	
			2...4	4...6				
1	500	570	350	760	50	-	139	1,5
2	500	570	350	760	-	5	141	1.5

* водный раствор Ср = 35 %-ой концентрации.

Результаты исследований приведены в виде графических зависимостей рисунка 1 (а; б).

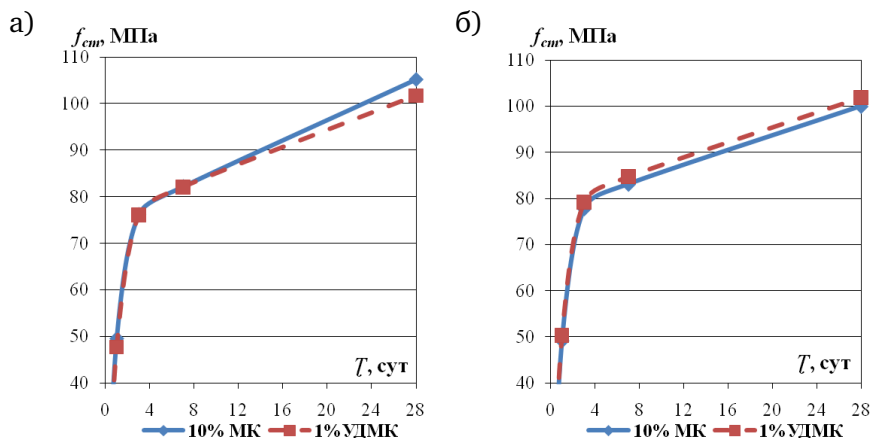


Рисунок 1. Кинетика твердения (роста прочности на сжатие) бетона, твердевшего в нормально-влажностных условиях (марка по подвижности бетонной смеси П1) (а) и с начальным разогревом до $t \sim 30...35$ °С и выдержке 22 ч. и остывании в устройстве для прогрева до распалубки (марка по подвижности бетонной смеси П2) (б)

Очевидно практическое равенство тенденции роста прочности бетона, что подтверждает возможность замены 10 % традиционного микрокремнезема (МК) на 1 % ультрадисперсного микрокремнезема (УДМК) в высокопрочном бетоне без снижения темпа его твердения и уровня прочности.

Задачами следующего этапа исследований была, с одной стороны, оценка эффективности разных пластифицирующих добавок на основе поликарбоксилатных смол («Стахемент 2000», «Реламикс ПК» (производства Российской Федерации) и «Sika ViscoCrete» (Швейцария)) в составе разрабатываемой полифункциональной добавки, с другой – оценка эффективности полифункциональной добавки в «рядовых» по прочности бетонах (с обеспечением классов прочности на сжатие до С 50/60), а также ее эффективность в бетоне, приготовленном из литых бетонных

смесей марки П5 (с осадкой конуса ОК ≥ 21 см; составы бетона по таблице 2).

В таблице 3 приведены данные о росте и уровне прочности высокопрочного бетона к 28 суткам, определенной по 4-м наибольшим в сериях из 6-ти образцов (ГОСТ 10180–2012). Коэффициент вариации прочности серии (42 образца) составил менее 4 %, что свидетельствует о высокой степени однородности бетона (подтверждается также стабильностью величины средней плотности бетона в образцах) и достоверности результатов исследований.

Экспериментальные данные таблицы 3 однозначно показывают практическое равенство кинетики твердения и упрочнения бетона, во-первых, приготовленного с добавкой в 10 % МК от массы цемента и с 1,0 %-ой добавкой УДМК, а во-вторых, как при использовании добавки «Стахемент 2000» (см. рис. 1), так и добавок «Реламикс ПК» и «Sika ViscoCrete» в составе полифункциональной добавки – 1,0 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА + 0,5...1,0 % Пл. Это позволяет при необходимости варьировать в ее составе применяемый компонент пластификатора (в частности, по факту наличия или соотношения их стоимости) в интересах пользователя (производителя).

Кроме отмеченного, очевидно в составах № 4 и № 5, а также № 6 и № 7 снижение в начальный период твердения темпа роста прочности бетона с увеличением дозировки пластификатора с 0,5 % до 1,0 % от массы цемента при одновременно обеспечиваемом повышении пластичности бетонных смесей (от марки П2 (ОК $\sim 5...6$ см) до марки П5 (ОК $\sim 23...24$ см)). Этот естественный для пластифицирующих добавок, содержащих ПАВ, эффект «нивелируется» к 7-ым суткам и в более поздние сроки твердения бетона.

Важным результатом приведенных данных (таблица 3) является подтверждение эффективности разрабатываемой полифункциональной добавки в высокопрочном бетоне из литых бетонных смесей марки по подвижности П5 (ОК $\sim 23...24$ см; составы № 5 и № 7), а также для «рядовых» по подвижности бетонных смесей марки П2 (составы № 1 и № 2 по сравнению с составами № 4 и № 6).

**Прочность на сжатие образцов высокопрочного бетона
в зависимости от введения добавок**

№ состава	Вид добавки и количество в % от МЦ	В/Ц	ОК, см	Средняя плотность ρ , кг/м ³		Прочность на ска- тие f_c , МПа		Средняя плотность ρ , кг/м ³		Прочность на сжатие $f_{cm,28}$	
				1-е сутки	7-е сутки	28-е сутки	МПа	%			
1	10%МК+ 0,5%РелПК	0,253*	6 (П2)	2495	46,6	2508	78,7	2509	100,8	100	
2	1%УДМК+ 0,5%РелПК	0,279*	5 (П2)	2503	45,3	2505	78,6	2512	101,9	101	
3	1%УДМК+ 1,0%РелПК	0,287*	23 (П5)	2505	32,5	2507	78,3	2512	100,8	100	
4	1%УДМК+ 0,5%СН+0,25%СА+ 0,5%РелПК	0,283*	6 (П2)	2506	52,6	2510	85,1	2520	108,1	107	
5	1%УДМК+ 0,5%СН+0,25%СА+ 1,0%РелПК	0,293*	23 (П5)	2507	45,5	2515	85,9	2525	102,4	102	
6	1%УДМК+ 0,5%СН+0,25%СА+ 0,5% SikaVK	0,285*	5 (П2)	2506	51,4	2510	86,0	2516	106,6	106	
7	1%УДМК+ 0,5%СН+0,25%СА+ 1,0% SikaVK	0,289*	24 (П5)	2510	46,0	2512	84,2	2520	104,0	103	

* водоцементное отношение бетона: $V/C = V / (C + МК(УДМК))$, доли ед.

В первую очередь существенно то, что за счет ускоряюще-уплотняющего компонента (0,5 % СН + 0,25 % СА) в полифункциональной добавке рост прочности бетона в первые 24 ч. твердения составил $(52,6 - 45,3) : 45,3 \cdot 100 \sim 16$ % для образцов бетона из смесей с ОК $\sim 5...6$ см (составы № 2 и № 4) и сохранился на уровне $(108,1 - 101,9) : 101,9 \cdot 100 \sim 6$ % в проектном (28 сут.) возрасте.

Кроме этого, полифункциональная добавка к 24 ч. твердения обеспечила практическое равенство прочности бетона из литых

(марки П5) смесей (составы № 5 и № 7) составам из малоподвижных (марки П2) смесей (составы № 1 и № 2), содержащих добавки МК и УДМК и пластификатора. При этом после 7 суток твердения уровень прочности бетона из литых смесей с полифункциональной добавкой превысил ее значения для бетона с МК и УДМК и пластификатором; к 28 суткам эта тенденция превышения прочности сохранилась, составив $\sim 2...4\%$.

Эти результаты свидетельствуют о том, что ранее выявленные на цементном камне закономерности [1] влияния веществ, входящих в состав полифункциональной добавки, на реакции цемента с водой в их присутствии реализуются и в цементном бетоне.

ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННОГО ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ

Целью следующего этапа исследований была оценка эффективности применения разрабатываемой полифункциональной добавки в «рядовом» по прочности конструкционном тяжелом бетоне, характеризующемся расходом цемента в 250...450 кг на 1 м^3 и прочностью на сжатие менее класса С 35/45 (СТБ 1544–2005) или по абсолютной величине не более «требуемой» прочности $f_{\text{cm}} \leq 57,8\text{ МПа}$ при коэффициенте ее вариации $V_m = 13,5\%$.

Для этого были изготовлены серии образцов бетона из равноподвижных бетонных смесей, но при разных расходах цемента. При этом в состав вводили только пластификатор (в оптимальной дозировке, равной 0,5 % Ст2000 от массы цемента), а в сопоставляемые – разрабатываемую полифункциональную добавку «0,5 % Ст2000 + 0,5 % СН + 0,25 % СА + 1,0 % УДМК». Номинальный состав бетона при содержании цемента в 250 кг на 1 м^3 характеризовался расходом песка – 850 кг; щебня гранитного (крупностью 5...20 мм) – 1200 кг; расход воды во всех случаях подбирали для получения осадки конуса ОК $\sim 6 \pm 1\text{ см}$. При увеличении расхода цемента в составе бетона уменьшали содержание в нем песка на примерно равную объемную долю, приняв для расчета величину «истинной» плотности цемента (по данным проф. И. А. Ахвердова [4]) $\rho_{\text{ц}}^{\text{и}} \sim 2700\text{ кг/м}^3$ и плотность зерен песка $\rho_{\text{п}}^3 \sim 2650\text{ кг/м}^3$.

В таблице 4 приведены результаты испытаний в кинетике твердения бетона и данные о прочности бетона на сжатие в проектном возрасте (28 сут.) нормально-влажностного твердения. Данные по прочности получены по 4-ем наибольшим образцам (100 x 100 x 100 мм) из 6-ти в серии. Образцы готовили из равноподвижных бетонных смесей марки П2 (ОК ~ 5...6 см), поправочный (масштабный) коэффициент $\alpha = 0,95$ (ГОСТ 10180–2012) учтен.

Приведенные в таблице 4 данные отражают изменения прочности бетона, приготовленного с добавкой 0,5 % Ст2000 от МЦ (раздел А) и результаты испытаний образцов бетона с полифункциональной добавкой (раздел Б); все при твердении бетона в нормально-влажностных условиях. Из экспериментальных данных очевидна эффективность полифункциональной добавки в бетоне, отраженная в росте его прочности во все сроки твердения, для всех вариантов состава (по расходу цемента), а также при примерном равенстве водоцементного отношения составов бетона, характеризующихся равенством расхода цемента.

Таблица 4

**Средняя плотность и прочность на сжатие образцов
тяжелого бетона при различном содержании цемента
(подвижность ОК ~ 5...6 см)**

Расход цемента, кг на 1 м³	(В/Ц) бетона	Средняя плотность бетона, кг /м³	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плотность бетона, кг /м³	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плотность бетона, кг /м³	Прочность на сжатие, МПа	Средняя плотность бетона, кг /м³	Прочность на сжатие, МПа	Класс бетона *
		1-е сутки	3-и сутки	7-е сутки	28-е сутки					
		А. Составы, содержащие 0,5 % Ст2000								
250	0,42	2510	11,7	2510	21,0	2515	31,8	2530	35,5	С 22/27,5
300	0,35	2505	12,5	2510	25,0	2510	41,3	2520	44,5	С 28/35
350	0,31	2505	14,1	2507	32,3	2515	49,0	2525	51,5	С 30/37

400	0,29	2500	15,9	2510	37,2	2510	51,5	2520	55,9	С 32/40
450	0,28	2500	16,0	2505	38,5	2510	52,0	2510	58,0	С 35/45
Б. Составы, содержащие 0,5 % Ст2000 + 0,5 % СН + 0,25 % СА + 1,0 % УДМК										
250	0,36	2535	18,1	2545	29,8	2555	51,2	2570	59,2	С 35/45
300	0,34	2530	19,2	2540	35,1	2550	59,8	2560	68,2	С 40/50
350	0,31	2530	20,2	2540	39,4	2550	64,1	2560	71,4	С 45/55
400	0,30	2530	22,3	2542	50,2	2550	68,6	2560	75,3	С 45/55
450	0,28	2520	24,1	2540	55,1	2550	74,1	2555	80,2	С 50/60

* класс бетона на сжатие по СТБ 1544–2005.

При этом рост прочности бетона в первые сутки твердения для состава с расходом цемента Ц = 250 кг составил ~ 54,7 %, а для Ц = 450 кг ~ 50,6 %. К проектному возрасту прирост прочности для означенных составов бетона составил ~ 66,8 % и ~ 38,3 % соответственно при большем эффекте в составе с меньшим расходом цемента.

К изложенному следует добавить, что эффективность полифункциональной добавки в конгломератном материале – бетоне – существенно выше, чем в цементном камне. В частности, по ранее приведенным данным [1] о росте прочности цементного камня с добавкой пластификатора 0,5 % Ст2000 от МЦ и с полифункциональной добавкой его прочность возросла через 24 ч. твердения на ~ 20 %, а к 28 сут. возрасту на ~ 17,4 %. То есть существенно меньше прироста прочности тяжелого бетона. Можно полагать, что рост прочности бетона обеспечивается как за счет этого роста прочности цементного камня, так и за счет существенного роста сил сцепления в зоне его контакта с заполнителем. Известно [5, 6], что в объемах цементного камня в зоне контакта с поверхностью зерен заполнителя сосредотачивается повышенное количество гидроокиси кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Присутствующий в полифункциональной добавке активный ультрадисперсный кремнезем вступает с ним в реакции с образованием в этих объемах дополнительного количества гидросиликатов кальция, что обеспечивает как

уплотнение, так и упрочнение зоны контакта и способствует росту прочности бетона. Этот вывод подтверждается как установленным ее ростом, так и (как это будет показано далее) ростом воздухо-, водонепроницаемости и морозостойкости бетона с полифункциональной добавкой, т. е. ростом его плотности и непроницаемости.

Одной из задач настоящих исследований является снижение энергетических затрат в технологии производства бетонных и железобетонных изделий при использовании разрабатываемой полифункциональной добавки. В таблице 5 приведены экспериментальные данные по оценке изменений в кинетике твердения и уровню прочности бетона с ускоряюще-уплотняющим компонентом (0,5 % СН + 0,25 % СА) полифункциональной добавки и с полифункциональной добавкой, образцы которого твердели по режиму 2 ч. – предварительная выдержка, 2 ч. – подъем температуры до 40...45 °С (до температуры бетона в образцах ~ 30...35°С), 12 ч. – выдержка в тепловом устройстве, распалубка образцов и первые испытания на сжатие. Далее образцы бетона до испытаний хранили в камере нормально-влажностного твердения. Данный режим имитировал производственные условия твердения бетонных и железобетонных изделий по энергосберегающей технологии [7 9]. В частности, исходя из условия, что, например, отформованные к 16.00 (к окончанию 1-ой смены рабочего дня) изделия до 18.00 выдерживаются в устройстве для тепловой обработки, с 18.00 до 20.00 осуществляется подъем температуры, а затем изделия выдерживаются без дальнейшего подвода тепла в устройстве в течение 12 ч. до 8.00 следующего дня, т. е. до распалубки с началом очередной 1-ой смены. Равным образом такой режим твердения бетона (изделий) соответствует организации работ и для 2-ой производственной смены предприятия [8].

Из результатов экспериментов следует, во-первых, очевидный рост прочности бетона во все сроки, сразу после «прогрева» и вплоть до проектного (28 сут.) возраста, при введении в его состав обоих вариантов добавок. В наибольшей степени прочность возрастает при применении полифункциональной добавки, по сравнению с прочностью бетона, не содержащего добавок и содержащего только ускоряюще-уплотняющий ее компонент (составы № 7, № 8 и № 9 против № 1, № 2 и № 3 и № 4, № 5 и № 6 соответственно). Это предсказуемый результат, обусловленный

значительным снижением водоцементного отношения в равно-подвижных бетонных смесях за счет эффективного пластификатора, а также за счет уплотняющего – упрочняющего зону контакта «цементный камень – заполнитель» действия добавки ультратонкого микрокремнезема.

Таблица 5

Прочность на сжатие образцов тяжелого бетона, содержащего ускоряюще-уплотняющий компонент (0,5 % СН + 0,25 % СА) и полифункциональную добавку 0,5 % Ст2000 + 0,5 % СН + 0,25 % СА + 1,0 % УДМК, при различном содержании цемента (подвижность смеси ОК ~ 5...6 см) с начальным разогревом бетона до 30...35 °С

№ состава бетона	Расход цемента, кг на 1 м ³	(В/Ц) бетона	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте				Класс бетона
			16 ч. ****	24 ч.	3-и сутки	28-е сутки	
1	250*	0,61	16,0	16,8	22,3	28,8	С 18/22,5
2	350*	0,47	25,1	26,3	32,5	41,7	С 25/30
3	450*	0,43	30,5	32,3	39,8	48,8	С 30/37
4	250**	0,58	23,3	24,3	25,2	32,3	С 20/25
5	350**	0,45	33,9	35,7	38,0	45,8	С 28/35
6	450**	0,41	40,4	42,5	44,6	52,5	С 32/40
7	250***	0,42	40,3	41,9	47,1	56,6	С 32/40
8	350***	0,31	54,2	55,9	58,5	70,5	С 45/55
9	450***	0,28	63,1	65,0	69,1	77,8	С 50/60

* бетон из смесей равной подвижности без добавок;

** бетон с добавкой 0,5 % СН + 0,25 % СА; *** бетон с полифункциональной добавкой;

**** испытания «горячих» образцов (t ~ 30...35°С) сразу после распалубки.

Анализ соотношения прочности бетона сразу после «прогрева» (в 16 ч.) с прочностью в проектном возрасте (28 сут.; после «дозревания» бетона в нормально-влажностных условиях) показывает, что ее уровень составляет ~ 70...90 % от «проектной» для образцов с обоими видами добавки; без добавок прочность после «прогрева» ниже и составляет ~ 55...62 % от 28-суточной. При этом большие значения относительной прочности бетона соответствуют составам № 8 и № 9 с большими содержанием цемента и наличием полифункциональной добавки.

Необходимо отметить, что этот уровень прочности бетона после «прогрева» от ее значения в проектном возрасте обеспечивает как условие передачи усилия напрягаемой арматуры на бетон, так и бездефектную распалубку изделий, что не обеспечивается в составах-аналогах без добавок. Тем самым создаются необходимые и достаточные условия для реализации эффективной энергосберегающей технологии изготовления сборных изделий. Одновременно следует отметить тенденцию к снижению в проектном 28-суточном возрасте прочности бетона с «прогревом» (таблица 5) относительно бетона, твердевшего в нормально-влажностных условиях (таблица 4), при прочих равных условиях.

Очевидно, что ускоренное формирование и упрочнение структуры бетона с полифункциональной добавкой в начальные 24 ч. твердения при разогреве до $t \sim 30...35^\circ\text{C}$ и выдерживании в условиях «горячего» термоса (температура бетона в образцах поднималась до $40...45^\circ\text{C}$ за счет экзотермии цемента) незначительно, но усложняет последующее протекание реакций взаимодействия цемента с водой, что отражается в замедлении темпа роста прочности бетона в более поздние сроки. Вместе с тем отмеченное снижение прочности незначительно и находится в пределах соответствия, требуемого для классов С 45/55 и С 50/60 уровня (таблица 4 и таблица 5).

Кроме означенного, использование полифункциональной добавки создает условия для экономии цемента. Существенный рост прочности бетона за счет комплексного воздействия этой добавки на процессы, сопровождающие его твердение, обеспечивает этот эффект. Например, по данным таблицы 4 для бетона с расходом цемента в 350 и 400 кг на 1м^3 (твердение в

стандартизованных нормально-влажностных условиях) обеспечивается один и тот же класс по прочности на сжатие – С 45/55. То есть повышение расхода цемента на $(400 - 350) : 350 \cdot 100 \sim 14,0 \%$ в данном примере создает только «запас» прочности, необходимой для обеспечения указанного класса. Еще более существенна разница между бетоном, приготовленным без добавок и с полифункциональной добавкой, что позволяет снижать до 10...15 % расход цемента по критерию обеспечения требуемой прочности бетона. Ограничивающим фактором являются условия формирования бетона при изготовлении конкретных изделий или возведении (устройстве) монолитных конструкций, то есть формуемость (или удобоукладываемость) бетонной смеси в сочетании с приемами ее подачи, укладки и уплотнения в формах или опалубках.

В таблице 6, а также на рисунках 2 и 3 приведены результаты оценки важнейших эксплуатационных свойств и характеристик бетона, полученные на образцах «рядового» и высокопрочного ($f_{cm,28} \sim 100...110$ МПа) бетона по стандартизованным методикам действующих нормативных документов. Номинальные составы бетона № 1 и № 2 идентичны по расходу твердофазных компонентов (при содержании цемента 350 кг на 1 м³ бетона) и по подвижности бетонной смеси (ОК $\sim 5...6$ см). Но за счет полифункциональной добавки водоцементное отношение для состава № 2 равнялось В/Ц $\sim 0,31$ доли ед., а для № 1 – В/Ц $\sim 0,47$ доли ед.

Отличие составов бетона № 3 и № 4 заключалось в добавках: № 3 – 1,0 % пластификатора в совокупности с 10 % от МЦ традиционного микрокремнезема, а в состав № 4 введена полифункциональная добавка.

Из результатов исследований очевиден эффект (как в «рядовом» по прочности бетоне, так и в высокопрочном), который обеспечивает введение в состав разрабатываемой полифункциональной добавки. На фотографии рисунка 2 видно, что внешний вид образцов бетона состава № 4 после 37 циклов испытаний на морозостойкость в солевом растворе не имеет признаков морозной деструкции. А анодные поляризационные кривые рисунка 3 показывают рост защитной способности бетона с полифункциональной добавкой (рисунок 3б, при оценочной величине потенциала

$E = 300\text{МВ}$) за счет роста его плотности и непроницаемости под влиянием этой добавки.

Таблица 6

Результаты оценки эксплуатационных свойств бетона

Характеристика состава бетона (класс по прочности на сжатие)	Водопоглощение по массе, %	Водонепроницаемость (по воздухо-проницаемости)		Морозостойкость		Защитная способность (i , мкА/см ² при $E=300\text{МВ}$)
		a_p , см ³ /с	Марка, W	Количество циклов в 5 % растворе NaCl (1-ый метод)	Марка, F***	
1. Рядовой бетон без добавок (С 25/30)	4,8	0,150	4	8 (300)	300	4,4
2. Рядовой бетон с полифункциональной добавкой (С 45/55)	3,5	0,095	8	15 (500)	500	3,0
3. Высокопрочный бетон*	2,4	0,0094	20	37** (1000)	1000	—
4. Высокопрочный бетон с полифункциональной добавкой*	2,0	0,0066	20	37** (1000)	1000	—

* состав № 3 – с 1,0 % пластификатора (Ст2000) и 10,0 % традиционного микрокремнезема; состав № 4 – с полифункциональной добавкой 1,0 % Ст2000 + + 0,5 % СН + 0,25 % СА + 1,0 % УДМК;

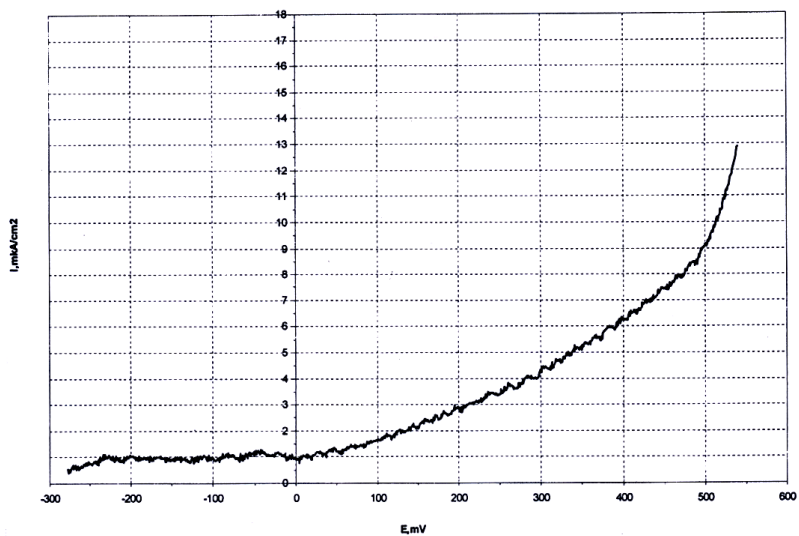
** эксперимент прекращен, но образцы бетона не имеют дефектов (рисунок 2), и их прочность практически на уровне исходной (т. е. контрольных образцов до начала испытаний);

*** марка по морозостойкости приведена для бетона общестроительного назначения.



Рисунок 2. Фотографии образцов бетона после 37 циклов замораживания-оттаивания в 5 % растворе NaCl

a)



б)

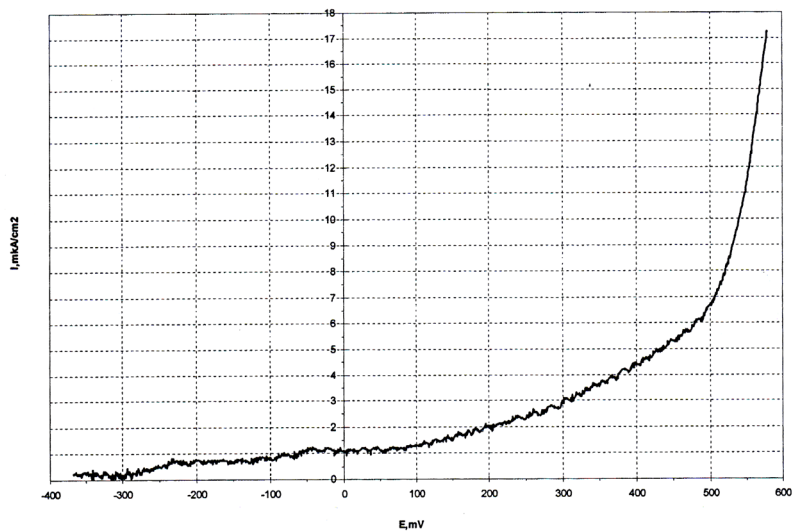


Рисунок 3. Анодные поляризационные кривые образцов состава № 1 (а) и № 2 (б) таблица 6 после 10 циклов насыщения (в 5 % растворе NaCl) – высушивания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана эффективность полифункциональной комплексной добавки в бетон, проявляющаяся в повышении темпа роста, уровня прочности и эксплуатационных свойств тяжелого конструкционного бетона.

Приведены данные, подтверждающие возможность замены традиционного микрокремнезема, который дозируют в бетон в количестве 10 % от массы цемента, на ультрадисперсный микрокремнезем в дозировке 1 % от массы цемента без снижения при этом прочности (на сжатие) бетона.

Экспериментально показана возможность значительного снижения энергетических затрат на прогрев бетона с полифункциональной комплексной добавкой за счет использования «термостого» режима его твердения с начальным разогревом бетона до 30...35 °С и последующей выдержкой в тепловом устройстве без подвода тепла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гуриненко, Н. С. Полифункциональная добавка с ультрадисперсным микрокремнеземом для цементного бетона / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батыновский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С.135–154.
2. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – Ленинград : Химия, 1978. – 392 с.
3. Батыновский, Э. И. Особенности технологии бетона прочностью 100-150 МПа с углеродными наноматериалами / Э. И. Батыновский, В. Д. Якимович, П. В. Рябчиков // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2. – С. 59–67.
4. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – Москва : Стройиздат, 1981. – 464 с.
5. Wang Jia Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste / Wang Jia // J. Chin. Silic. Soc. - 1987 - N2. – P. 114 – 121.

6. Scrivener, K. L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete / K. L. Scrivener, A. K. Crumbie, P. L. Pratt // *Bond / Cementitious Compos.: Sump.*, Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987. – Pittsburgh (Pa). – 1988. – P. 87–88.
7. Батыновский, Э. И. Технологические особенности производства ЖБК с применением ускорителей твердения бетона / Э. И. Батыновский, Р. Ф. Осос // *Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительство зданий и сооружений: сб. статей / под ред. Н. П. Блещика, Э. И. Батыновского.* – Брест : БПИ, 1998. – Вып. 1. – С. 22–25.
8. Батыновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батыновский, Е. А. Иванова, Р. Ф. Осос // *Строительная наука и техника.* – 2006. – № 3. – С. 7–17.
9. Протько, Н. С. Беспрогревная и малоэнергоёмкая технология производства бетонных и железобетонных изделий с применением полиметаллического водного концентрата : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / Н. С. Протько; Белорусская государственная политехническая академия. – Минск, 2001 – 20 с.

Статья поступила: 13.11.2019

REFERENCES

1. Gurinenko N. S., Batyanovskiy E. I. Polyfunctional additive with ultradispersed microsilica for cement concrete. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers.* Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 10. 2018. pp. 135–154. (rus)
2. Rabinovich V. A., Khavin Z. Ya. *Kratkiy khimicheskiy spravochnik* [Brief Chemical Reference]. L. : Khimiya, 1978. 392 p. (rus)
3. Batyanovskiy E. I., Yakimovich V. D., Ryabchikov P. V. *Construction Science and Technology.* 2012. №2. pp. 59–67. (rus)

4. Akhverdov I. N. *Osnovy fiziki betona* [Fundamentals of Physics Concrete]. M. : Stroyizdat, 1989. 464 p. (rus)
5. Wang Jia (1987) Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste. *J. Chin. Silic. Soc.*. 1987, N2. – pp. 114 – 121.
6. Scrivener K. L., Crumby A. K., Pratt P. L. (1988) A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Bond/ Cementitious Compos.: Sump.*, Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987. – Pittsburgh (Pa). 1988. pp. 87–88.
7. Batyanovskiy E. I., Osos R. F. *Problemy technologii proizvodstva stroitelnykh materialov, izdeliy i konstruktsiy, stroitelstvo zdaniy i sooryzheniy*. 1998. Vyp. 1. pp. 22–25. (rus)
8. Batyanovskiy E. I., Ivanova E. A., Osos R. F. *Construction Science and Technology*. 2006. № 3. pp. 7–17. (rus)
9. Protko N. S. *Besprogrevnaya i maloenergoemkaya технологиya proizvodstva betonnykh i zhelezobetonnykh izdeiy s primeneniem polimetallicheskogo vodnogo kontsentrata* [Heat-free and low-power production technology of concrete and reinforced concrete products using polymetallic water concentrate]. Minsk: BSPA, 2001. 20 p. (rus)

Received: 13.11.2019